

平成 30 年豪雨により崩落した史跡丸亀城跡石垣の地盤調査と石垣解体工事

鹿島建設(株) 正会員 ○村上武志 山地伸弥 清谷一旗 椿 治彦 直井智治
丸亀市 東 信男 上甲育司 阪本晃弘 大平拓史

1. はじめに

平成 30 年 7 月の西日本豪雨および 10 月の台風 24 号による豪雨を引き金とし、丸亀城南西部の石垣が大規模に崩落した(写真-1)。丸亀城は安山岩と花崗岩を基礎岩盤とした亀山に築かれた平山城であり、盛土はおもにまさ土で構成されている。高さ日本一の石垣を有する城郭であり、複数の石垣を含む内濠内が国の史跡に指定されている。崩落した三の丸石垣、帯曲輪石垣を合わせた高さは約 30m におよび、現在復旧に向けて、調査・設計および石垣解体工事を施工中である。本報では、地盤調査結果と石垣解体中における石垣背面の掘削法面部の安定性について報告する。

2. 崩落の経緯

崩落位置と発生日を図-1に示す。帯曲輪南面石垣が崩落した 7 月 7 日まで連続雨量は累計 310mm 程度であり、降雨が崩落の直接的な誘因と考えられる。その後 9 月末に台風 24 号によって 24 時間で 131.5mm 程度の降雨を記録している。南西面石垣が崩落した 10 月 8 日に降雨は観測されていないが、帯曲輪南西面の石垣は経年的に前に倒れこむような変位が生じており、降雨による水位上昇が繰り返されることで変位が累積し、崩落した可能性が考えられる。丸亀城は亀山の上に盛り上げるように築城されているが、亀山は北東側が高く南西側が低い。この基礎岩盤の傾斜によって南西側に地下水が集まりやすいことも素因の一つとして考えられる。

3. 地質調査¹⁾

石垣崩落の原因究明および石垣撤去時の安定性、復旧設計のための調査として、丸亀城全体の標準貫入試験、盛土の物理試験、力学試験(三軸 CUB 試験)および現場透水試験を実施した。調査位置を図-2に示す。既往の調査結果²⁾と合わせた標準貫入試験結果と土層断面を図-3に示す(断面は図-2に矢視で示す位置)。

標準貫入試験：盛土の N 値はおおむね $N < 10$ であり、部分的に $N = 1$ 程度の低い箇所も見られた。盛土中には玉石や割石が点在しており、内部構造は一様でない。基礎岩盤は強風化部を除きおおむね $N > 50$ であった。調査時の地下水位は基礎岩盤と盛土の境界付近にあった。

物理特性：湿潤密度は $1.9 \sim 2.0 \text{ kg/m}^3$ 程度であり、盛土材の細粒分含有率は $F_c = 18\% \sim 64\%$ とバラツキが大きい。自然含水比は $w_n = 17\% \sim 24\%$ 、塑性指数は $I_p = 10 \sim 33$ 程度であった。

力学特性：崩落した石垣付近の盛土の三軸 CUB 試験結果を図-4に示す。粘着力 c' は $4 \sim 26 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角 ϕ' は $17 \sim 32^\circ$ であった。



写真-1 石垣崩落状況

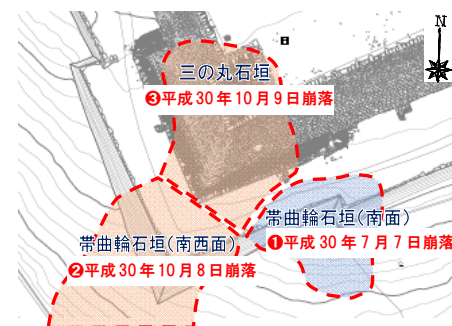


図-1 崩落の経緯

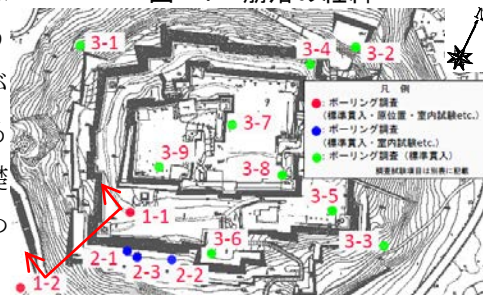


図-2 調査位置図

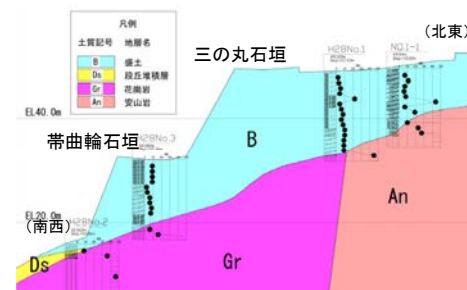


図-3 崩落前の断面図

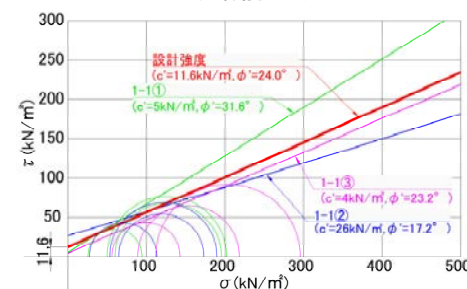


図-4 三軸 CUB 試験結果

キーワード 石垣, 豪雨災害, 史跡丸亀城跡, 文化財, 円弧すべり, グラウンドアンカー

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株)土木設計本部 TEL03-6229-6749

設計に用いる強度定数は試験結果を平均し、粘着力 $c'=11.6\text{kN/m}^2$ 、 $\phi'=24^\circ$ とした。

4. 石垣復旧工事に向けた掘削工事（三の丸石垣解体工事）

石垣復旧にあたり、緩んだ石垣や崩落した土砂を撤去する必要がある。復旧に向けた石垣解体範囲は丸亀市が設置した丸亀城石垣復旧専門部会（以下、専門部会）によって審議され丸亀市により決定された。盛土は丸亀城の文化財の一つであり、石垣解体に伴う掘削は最小限にしなければならない。また、崩落した三の丸石垣の背面には本丸石垣が控えており、盛土の安定勾配まで掘削勾配を緩くするためには本丸石垣に影響を及ぼす。そこで本丸石垣を残しつつ掘削を最小限とする掘削形状を検討した結果、無対策では安定性が保てないことが確認された（図-5）。このため補助工法を用いて掘削することとした（図-6）。掘削による安定化対策工は、盛土が重要な文化財であることを考慮して、盛土内に現代工法を可能な限り残置させず撤去できる除去式グラウンドアンカー工法を採用した。この工法はUターン式となっており、石垣復旧時にPC鋼より線を回収することができる。また、アンカー工法に伴う受圧板による受圧面圧力は、掘削法面部にて実施したポータブルコーン貫入試験を基に算出した支持力から、 120kN/m^2 以下となるよう制限することで盛土に過度に変位を生じさせないように配慮した。

5. 石垣背面の掘削中に出現した埋没石垣を考慮したアンカー配置

検討に従って切土を進めたが、切土を開始後すぐに埋没石垣が出現した（写真-2）。埋没石垣も重要な遺構であるため、可能な限り埋没石垣を撤去せずに切土を進めることが審議および決定された。その結果、設計通りのアンカーを打設することが困難であった。そこで埋没石垣を避けつつ、盛土の安定性を確保するために、アンカーの設計を見直した。その際、3次元CADを活用し、アンカー同士の干渉をチェックしながら一本ごとに設計を行い、慎重に施工を進めている（図-7）。このほか、掘削に伴い、文化財としての調査に加え、石垣背面の栗石の粒度・分布形状や盛土の構造など三の丸石垣の支持構造について調査を実施中である。

6. おわりに

地盤調査によって400年前に築造された盛土の物理特性や力学特性が分かった。現在三の丸石垣解体工事を施工中（写真-3）であるが、今後帯曲輪石垣の解体に着手する。掘削に伴い、三の丸石垣の支持構造などが判明する可能性があるため、今後も注意深く調査を進めるとともに、崩落メカニズム解明および石垣復旧設計・施工を実施する予定である。なお、調査および復旧設計・施工に当たっては専門部会の指導を受けながら実施している。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 丸亀城石垣崩落復旧に伴う地質調査業務委託 報告書（令和2年3月 鹿島建設(株)）
- 2) 史跡丸亀城三の丸・帯曲輪内ボーリング調査業務委託 報告書（平成29年2月 (株)増田地質工業）

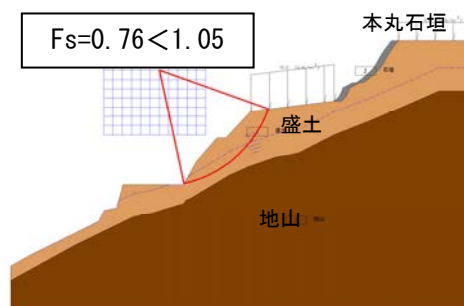


図-5 無対策の場合の安定検討

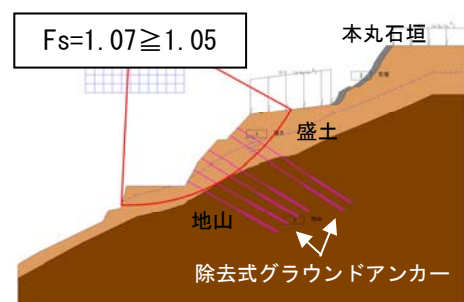


図-6 補助工法を考慮した設計

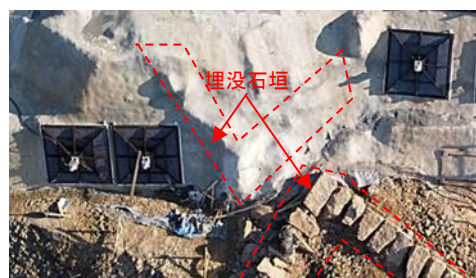


写真-2 出現した埋没石垣

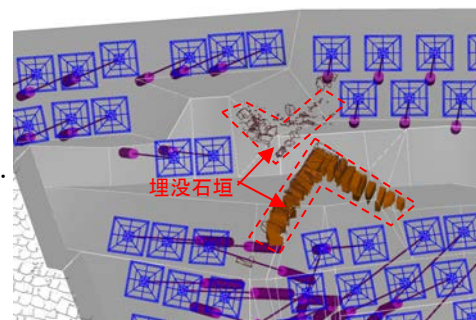


図-7 3次元CADを活用した配置検討



写真-3 令和3年3月時点の現場状況